

0716494-1

На правах рукописи

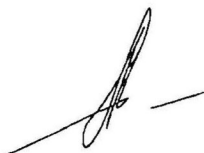
**НАДЕЕВ АДЕЛЬ ФИРАДОВИЧ**

**МАРКОВО-СМЕШАННЫЕ МОДЕЛИ  
В ТЕОРИИ ОБРАБОТКИ МНОГОЭЛЕМЕНТНЫХ СИГНАЛОВ  
ПРИ КОМПЛЕКСЕ ПОМЕХ**

Специальность 05.12.01- «Теоретические основы радиотехники»

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук



КАЗАНЬ 2000

Работа выполнена на кафедре «Радиоуправление»  
Казанского государственного технического университета им. А.Н.Туполева.

Научный консультант - академик Академии наук Республики Татарстан, Заслуженный деятель науки и техники Татарстана, доктор технических наук, профессор Чабдаров Ш.М.

Официальные оппоненты - Лауреат Премии Правительства РФ, Заслуженный изобретатель РФ, доктор технических наук, профессор Николаев А.И. (г.Москва);

НАУЧНАЯ БИБЛИОТЕКА  
КФУ



0000947818

- доктор физико-математических наук  
Непогодин И.А. (г.Казань);

- доктор физико-математических наук,  
профессор Белькович О.И. (г. Казань).

Ведущая организация – Институт проблем информатики Академии Наук Республики Татарстан. (г.Казань).

Защита состоится «25» мая 2000 г. в 14 часов 30 мин. на заседании диссертационного Совета Д.053.29.05 по присуждению ученой степени доктора физико-математических наук при Казанском государственном университете по адресу: 420008, Казань, ул.Кремлевская, 18, физический корпус, ауд. 212.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке им. Н.И.Лобачевского Казанского государственного университета.

Автореферат разослан «9» 04 2000 г.

Ученый секретарь  
диссертационного Совета,  
кандидат технических наук

В.С.Бухмин

## 1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Формулировка проблемы и ее актуальность.** Одной из центральных стержневых проблем теоретической радиотехники со времени ее возникновения и до настоящего времени является проблема помехоустойчивости радиотехнических устройств и систем. Важным и плодотворным направлением научно-технического прогресса в области теории и проектирования радиотехнических систем (РТС), систем связи и передачи информации, медицинских диагностических систем и других информационных систем является разработка новых методов обработки сигналов.

В широком классе информационных систем осуществляется обработка сигналов, представляющих собой последовательности элементарных дискретных сигналов – так называемых многоэлементных сигналов. Условия функционирования реальных информационных систем характеризуются совместным возмущающим воздействием дестабилизирующих факторов и комплекса разнородных помех. Это обуславливает стохастический характер сигналов и помех, представляющих собой случайные процессы со сложными нестандартными законами распределений.

В настоящее время стремительный прогресс в области микроэлектроники, программируемых вычислительных структур, информационных технологий закладывает качественно новый базис, обеспечивающий возможность реализации сложных оптимальных способов (алгоритмов) обработки случайных сигналов, построенных методами статистической радиотехники. Корреляционная теория оптимального приема, нашедшая широкое применение при ограниченных возможностях аналоговой и относительно простой реализации алгоритмов обработки, становится недостаточной, чтобы полноценно использовать потенциальные возможности новых микроэлектронных и информационных технологий.

Максимальная эффективность разработки элементов радиотехнических систем достигается в рамках комплексного подхода, охватывающего в единый процесс исследований выбор моделей и методов адекватного описания сигнально-помехового комплекса, методов синтеза алгоритмов обработки сигналов и реализующих их устройств.

Однако, при построении радиотехнических систем указанного класса существует определенное противоречие, заключающееся в том, что для повышения достоверности принимаемых в рамках данных систем решений необходимо учитывать максимальный объем входной информации, при этом оставаясь в рамках ограниченных системных ресурсов.

Одним из известных подходов к преодолению указанного противоречия в статистической радиотехнике является использование марковских моделей и методов. Общая теория марковских процессов была создана работами А.Н. Колмогорова, В. Феллера, В. Деблина, П. Леви, Дж. Дуба

и других. Применительно к задачам обработки случайных процессов аппарат теории марковских процессов исторически впервые был реализован для задач оптимального оценивания. Основопологающими работами математической теории оптимального оценивания стали работы А.Н.Колмогорова, Н.Винера, Р.Н.Калмана и Р.С.Бьюси.

Основопологающие и фундаментальные результаты с теории нелинейного нестационарного оценивания и управления принадлежат Р.Л.Стратоновичу, разработавшему в 1959 – 1966 г.г. теорию условных марковских процессов. Эта теория стала методологической основой дальнейших исследований в области оптимального оценивания и получила широкое развитие, в том числе в статистической радиотехнике.

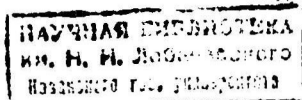
Использование марковских моделей обеспечивает конструктивное представление анализируемых случайных процессов и при определенных ограничениях позволяет синтезировать эффективно реализуемые алгоритмы, в частности, в задачах с дискретным временем – рекуррентные алгоритмы, хорошо реализуемые на основе современных цифровых программно-аппаратных средств и радиотехнических устройств.

Между тем, аналитические решения обобщенных уравнений фильтрации Стратоновича в настоящее время получены только для некоторых частных задач, в рамках определенных ограничений, к которым относится гауссовский характер аддитивных помех.

В современных условиях ограничение только классом стандартных нормальных распределений является сдерживающим развитие алгоритмического обеспечения современных информационных систем. Поэтому в настоящее время достаточно активно ведутся работы по поиску новых вероятностных моделей представления реальных случайных сигналов и помех, а также соответствующих методов анализа и синтеза. В частности, предлагаются модели на основе распределений Вейбула, Накагами, логарифмически нормального, гамма-распределения, распределений Пирсона и других. Разработан класс обобщенных распределений Пирсона, включающий достаточно большое количество известных законов распределений. Указанные модели удовлетворительно аппроксимируют отдельные виды сигналов и помех в конкретных частных задачах, однако не обладают достаточной универсальностью для описания произвольных распределений. Применение подобных классов моделей ограничивается также при:

- описании многомерных и многомодальных распределений;
- одновременном учете негауссовского характера полезных сигналов и аддитивных помех, в силу сложности или невозможности аналитического построения результирующих распределений при их взаимодействии.

Кроме того, существенным фактором, затрудняющим реализацию синтезированных на основе подобных моделей алгоритмов, является наличие





в них специфических нелинейных функционалов, определяемых видом выбранных вероятностных моделей и существенно изменяющихся при изменении как состава взаимодействующих процессов, так и при изменении вероятностных свойств хотя бы одного из них.

Мощный и эффективный инструментарий статистической радиотехники для работы с негауссовскими случайными процессами предоставляется в рамках теории смешанных, в частности, полигауссовых явлений. Полигауссовы модели обладают рядом известных замечательных свойств, в частности, они позволяют с заданной точностью представлять произвольные, в том числе многомодальные распределения, являются замкнутыми относительно линейных преобразований, обеспечивают возможность аналитического синтеза алгоритмов основных классов задач проверки гипотез в негауссовской постановке. При этом полигауссовы методы, обладая естественным параллелизмом, приводят к многоканальным параллельным алгоритмам, в каждом из каналов которых выполняется однотипный набор стандартных операций. Важным свойством данного класса алгоритмов является инвариантность структур алгоритмов к виду распределений негауссовских сигналов и аддитивных помех.

Однако известные смешанные модели не позволяют эффективно описывать протяженные многоэлементные сигналы и, как будет показано ниже, при решении задач синтеза алгоритмов обработки многоэлементных сигналов в комплексе хаотических негауссовских помех приводят к алгоритмам, сложность которых по показательному закону зависит от числа элементов сигналов.

**Основная проблема**, рассматриваемая в данной работе, может быть сформулирована следующим образом:

Необходимость теоретической разработки методов эффективного построения устройств помехоустойчивой обработки многоэлементных сигналов, обладающих совместной инвариантностью структуры к числу элементов сигналов и распределениям хаотических негауссовских помех.

**Актуальность** этой проблемы, в частности, обусловлена следующими причинами:

- Существуют практически важные задачи синтеза алгоритмического обеспечения современных информационных систем, эффективное решение которых возможно при объединении достоинств марковского и полигауссового подходов.
- В настоящее время наработан большой теоретический задел в рамках теории и приложений марковских случайных процессов и

теории полигауссовых случайных явлений. При этом отсутствует общая теория, с единых позиций объединяющая данные подходы.

- Прогресс в области микроэлектронных и информационных технологий закладывает качественно новый базис, обеспечивающий возможность осуществления сложных оптимальных способов (алгоритмов) обработки сигналов в реальном масштабе времени. При этом наиболее эффективно на базе современных параллельных микроэлектронных устройств реализуются алгоритмы, основанные на типовых наборах стандартных операций, обладающие свойствами внутреннего параллелизма и рекуррентности.

### **Цель и основные задачи работы**

Целью диссертационной работы является разработка теории обработки многоэлементных сигналов при произвольно заданных помехах, включая элементы теории нового класса случайных процессов - марково-смешанных случайных процессов и методологию синтеза помехоустойчивых алгоритмов обработки многоэлементных сигналов в негауссовской постановке, обеспечивающей совместную инвариантность структур алгоритмов к числу элементов сигналов и виду распределений помех.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие основные задачи:

- Разработать класс вероятностных моделей случайных процессов, органически сочетающих свойства смешанных и марковских вероятностных моделей.
- Разработать методологию статистического синтеза и решить на ее основе задачу синтеза обобщенного алгоритма классификации сигналов, сочетающего достоинства полигауссовых и марковских алгоритмов.
- Решить задачи синтеза оптимальных алгоритмов обработки флуктуирующих многоэлементных сигналов в комплексе хаотических негауссовских помех и анализа характеристик полученных алгоритмов.
- Разработать оригинальные устройства обработки многоэлементных сигналов, реализующие предлагаемые алгоритмы.

Как показывают наши исследования, целенаправленное совместное использование достоинств смешанных и марковских моделей может быть

плодотворно практически во всех теоретических задачах статистической радиотехники при анализе и синтезе линейных и нелинейных устройств и систем при негауссовских флуктуациях реальных сигналов и комплекса помех. Однако, наибольший интерес во многих практических приложениях представляют вопросы теоретической и экспериментальной разработки новых методов построения устройств приема и обработки многоэлементных сигналов. Поэтому в настоящей диссертации достоинства и особенности разработанных новых принципов совместного использования смешанных и марковских моделей, соответствующих новых методов, подробно исследуются, обосновываются и детально прорабатываются именно в области теоретической и экспериментальной разработки оптимальных и адаптивных алгоритмов обработки многоэлементных сигналов в сложной и изменчивой помеховой обстановке. При этом обеспечивается важное для практической реализации требование неизменности структур получаемых алгоритмов при изменениях как числа элементов сигналов так и распределений помех, то есть совместной инвариантности к числу элементов сигналов и к виду распределений помех.

**Методы исследования.** Используются аналитические методы статистической радиотехники, теории вероятности и математической статистики, теории статистических решений, теории марковских случайных процессов, теории полигауссовых случайных явлений, а также методы имитационного и статистического моделирования на ЭВМ.

**Научная новизна** результатов диссертационной работы состоит в том, что в ней впервые:

- предложен, адекватно формализован и описан новый класс марково-смешанных случайных процессов;
- предложен метод синтеза оптимальных алгоритмов классификации сигналов на основе марково-смешанных вероятностных моделей;
- получена каноническая форма алгоритма классификации сигналов, сочетающего свойства внутреннего параллелизма и рекуррентности;
- разработан алгоритм оценивания параметров марково-смешанной вероятностной модели многоэлементных сигналов в условиях априорной неопределенности;
- синтезированы оптимальные алгоритмы обработки флуктуирующих многоэлементных сигналов в комплексе

негауссовских помех, структура алгоритмов является инвариантной к числу элементов сигналов и виду распределений помех;

- определен и обоснован вид достаточной статистики для задачи последовательной проверки гипотез в виде вектора апостериорных вероятностей гауссовских компонент и вектора частных гауссовских функционалов отношения правдоподобия, получен алгоритм последовательной проверки двух гипотез в негауссовской постановке;
- получены оптимальные алгоритмы приема сигналов, конкретизированные для случая квазидетерминированных моделей радиопульсных сигналов и хаотических радиопульсных помех с учетом их интерференционного взаимодействия на фоне флуктуационной помехи.

**Практическая ценность работы** состоит в том, что в ней:

- Развита методология статистического синтеза, позволяющая аналитически синтезировать алгоритмы обработки многоэлементных сигналов, изначально основанные на однотипном наборе стандартных операций и обладающие структурами, инвариантными к числу элементов сигналов и виду распределений помех, что обуславливает возможность их эффективной реализации на основе современных устройств функциональной микроэлектроники, цифровых программно-аппаратных средств.
- Синтезированы алгоритмы, обеспечивающие повышение помехоустойчивости радиотехнических систем за счет оптимального учета взаимосвязи флуктуаций элементов многоэлементных сигналов и различий в характере флуктуаций реальных сигналов и помех.
- Разработан метод компьютерного моделирования марково-смешанных полигауссовых случайных процессов с требуемыми внутренними взаимосвязями для проведения исследований алгоритмов обработки многоэлементных сигналов методом статистического моделирования. Разработаны соответствующие компьютерные модели и программное обеспечение.

- Предложена марково-смешанная полигауссова вероятностная модель электрокардосигналов, обеспечивающая адекватное описание как флуктуаций электрокардосигналов в рамках каждого кардиоцикла, так и взаимосвязь флуктуаций различных кардиоциклов. Получен алгоритм классификации кардиоциклов, адекватный реализации в современных диагностических кардиокомплексах.
- Получены оригинальные технические решения помехоустойчивых устройств обработки многоэлементных радиосигналов, сформулированы практические рекомендации по построению подобных устройств на современной элементной базе.

#### **Основные положения, выносимые на защиту:**

- Класс марково-смешанных вероятностных моделей случайных процессов.
- Метод синтеза оптимальных алгоритмов классификации сигналов на основе марково-смешанных вероятностных моделей.
- Каноническая форма обобщенного алгоритма классификации сигналов на основе марково-смешанных вероятностных моделей, сочетающего свойства внутреннего параллелизма и рекуррентности, а также алгоритм оценивания параметров марково-смешанной вероятностной модели в условиях априорной неопределенности.
- Оптимальные алгоритмы обработки флуктуирующих многоэлементных сигналов, имеющие структуры инвариантные к числу элементов сигналов и виду распределений негауссовских помех, в том числе конкретизированные для случая квазидетерминированных моделей радиоимпульсных сигналов и хаотических радиоимпульсных помех с учетом их интерференционного взаимодействия на фоне флуктуационной помехи.
- Обоснованный вид достаточной статистики для задач последовательной проверки гипотез в виде вектора апостериорных вероятностей гауссовских компонент и вектора частных гауссовских функционалов отношения правдоподобия, а

также соответствующий алгоритм последовательной проверки двух гипотез на основе марково-смешанной полигауссовой вероятностной модели.

Метод компьютерного моделирования марково-смешанных полигауссовых случайных процессов и построенные на его основе компьютерные модели и программное обеспечение по статистическому моделированию полученных алгоритмов обработки многоэлементных сигналов. Результаты анализа полученных алгоритмов методом статистического моделирования.

Оригинальные устройства обработки многоэлементных сигналов, реализующие разработанные алгоритмы и практические рекомендации по построению подобных устройств на современной элементной базе.

**Внедрение результатов работы.** Основные результаты диссертационной работы внедрены в ряде НИР и НИЭР Федерального Научно-Производственного Центра по радиоэлектронным системам и информационным технологиям, а также использованы в ОАО «ТАТИНКОМ» и в учебном процессе по специальностям 201600, 201000, 201200 в Казанском государственном техническом университете им. А.Н.Туполева.

**Личный вклад автора в разработку проблемы.** Соискателем сформулирована проблема, поставлены задачи обеспечивающие ее решение, получены и обоснованы новые научные результаты, сформулированы основные положения, выводы и рекомендации защищаемой работы. Работы выполненные в соавторстве, объединены общим научным направлением, концепцией решения поставленных задач, предложенной соискателем. В них соискателю принадлежат марково-смешанные вероятностные модели случайных процессов, методы и результаты синтеза помехоустойчивых алгоритмов обработки многоэлементных негауссовских сигналов в комплексе негауссовских помех, алгоритмы адаптации в условиях априорной неопределенности, компьютерные модели и результаты анализа полученных алгоритмов методом статистического моделирования, оригинальные устройства обработки многоэлементных сигналов. Разработка программного обеспечения проводилась под научным руководством и при непосредственном участии соискателя.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы прошли апробацию на следующих научно-технических конференциях и семинарах:

44-я Всесоюзная научная сессия НТО РЭС им.А.С.Полова (Москва, 1989 г.); XI-й Всесоюзный семинар «Статистический синтез и анализ информационных систем» (Ульяновск, 1989 г.); Всесоюзная конференция «Методы представления и обработки случайных сигналов и полей» (Туапсе, 1989 г.); Всесоюзная конференция «Развитие новой техники радиоприемных устройств и обработки сигналов» (Горький, 1989 г.); Всесоюзная конференция «Методы и микрорезонансные средства цифрового преобразования и обработки сигналов» (Рига, 1989 г.); Всесоюзная конференция «Информационные методы повышения эффективности и помехоустойчивости радиосистем и систем связи» (Ташкент, 1990 г.); I-ая Всесоюзная конференция «Компьютерные методы исследования проблем теории и техники передачи дискретных сигналов по радиоканалам» (Евпатория, 1990 г.); Всесоюзный семинар «Проектирование, эксплуатация и испытание систем вторичной радиолокации УВД и систем предупреждения столкновения воздушных судов» (Новгород, 1989 г.); Республиканская школа-семинар «Методы представления и обработки случайных сигналов и полей» (Харьков, 1990 г.); Отраслевая конференция Минрадиопрома СССР «Состояние и перспективы развития основных направлений радиотехнологии и спецмашиностроения» (Казань, 1989 г.); I-я Отраслевая конференция Минрадиопрома СССР «Проблемы создания и производства бортовых радиоэлектронных комплексов» (Москва, 1989 г.); III региональный научно-технический семинар «Применение микропроцессоров, микро- и персональных ЭВМ» (Миасс, 1990 г.); VI Всероссийская научно-техническая конференция «Однородные вычислительные системы, структуры и среды» (Москва, 1993 г.); III Всероссийская научно-техническая конференция «Фазированные антенные решетки и перспективные средства связи» (Казань, 1994); 50-я сессия посвященная Дню радио (Москва, 1995 г.); 2-ая Всероссийская конференция «Распознавание образов и анализ изображений» (Ульяновск, 1995); Международная научно-техническая конференция «Теория и техника передачи, приема и обработки информации» (Харьков, 1995 г.); 51-ая Научная сессия, посвященная Дню радио (Москва, 1996 г.); Всероссийская конференция «Направления развития систем и средств радиосвязи» (Воронеж, 1996 г.); Международная конференция «Экраноплан-96» (Казань, 1996 г.); 52-ая научная сессия, посвященная Дню радио (Москва, 1997 г.); 53-ая научная сессия, посвященная Дню радио (Москва, 1998 г.); 54-ая научная сессия, посвященная Дню радио (Москва, 1999 г.); XIX Всероссийская научная конференция «Распространение радиоволн» (Казань, 1999 г.); V Международная научно-техническая конференция «Радиолокация, навигация, связь» (Воронеж, 1999 г.).

## 2. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, заключения, приложения, содержит 245 страниц машинописного текста, 45 рисунков, список литературы, включающий 198 наименований отечественных и зарубежных источников, в том числе 49 работ автора.

**Во введении** дано обоснование актуальности проблемы, формулируется цель работы, решаемые задачи, представлены основные положения выносимые на защиту. Указывается структура диссертации, форма апробации и внедрения ее результатов.

**В первой главе** - «Марково – смешанные вероятностные модели случайных процессов» - проведен анализ тенденций развития современной теории статистической радиотехники, рассмотрены основные свойства смешанных вероятностных моделей, приведен краткий обзор современного состояния теории марковских случайных процессов.

Рассмотрены вопросы адекватности вероятностных моделей и методов современным микроэлектронным и информационным технологиям. Показано, что для обеспечения эффективного использования потенциала современных устройств функциональной микроэлектроники и программно-аппаратных средств, указанные модели должны органически сочетать свойства смешанных и марковских моделей.

Смешанный случайный процесс определен системой:

$$\left\{ \begin{array}{l} (\Omega, \sigma, \mu_n) \\ (\Psi, B, P) \end{array} \right. \quad (1)$$

включающей вероятностное пространство  $(\Omega, \sigma, \mu_n)$  с пространством элементарных событий  $\Omega$ ,  $\sigma$ -алгеброй  $\sigma$  и заданной системой мер  $\mu_n$ , а также вероятностное пространство  $(\Psi, B, P)$  состоящее из пространства элементарных событий  $\Psi$ , выделенной на нем  $\sigma$ -алгеброй событий  $B$ , заключающихся в случайном выборе номеров компонент  $n$  взвешанной меры  $\mu$ . Взвешанная мера  $\mu$  задается в дискретной, непрерывной, или смешанной дискретно-непрерывной форме.

Выражение (1) хорошо иллюстрирует тот факт, что смешанный случайный процесс определяется на двух уровнях описания:

- Первый уровень - уровень компонентный, определяющий характер системы исходных стандартных случайных процессов.
- Второй уровень – смешивающий уровень, определяющий характер («механизм») стохастического смешивания исходных компонент.

Оба уровня в единстве определяют существо заданного смешанного процесса.

Предыдущие исследования в области теории смешанных процессов в существе своем были посвящены первому уровню. При этом механизм



смешивания не исследовался и не использовался для целенаправленного построения моделей с заданными свойствами.

Дано определение марково-смешанного случайного процесса. Случайный процесс  $\xi = \xi(t)$  называется марково-смешанным (м-смешанным), если он задается системой:

$$\begin{cases} (\Omega, \sigma, \mu_n) \\ (\Psi, B, P_m) \\ p(s, n(s), \tau, \tilde{B}) = P_m \{n(\tau) \in \tilde{B} | n(s)\} \end{cases} \quad (2)$$

где:  $(\Omega, \sigma, \mu_n)$  - вероятностное пространство с  $\sigma$ -алгеброй  $\sigma$  порождаемой всеми величинами  $\xi(t) = \xi(t, \omega)$ ,  $\omega \in \Omega$ ,  $t \in T$ ,  $\mu_n$  - условная вероятностная мера на  $\sigma$ , при этом,  $n = n(\tau)$  образует случайный марковский процесс на множестве  $T$  в фазовом пространстве  $(\Psi, B)$  с заданной вероятностной мерой  $P_m$  и переходной функцией  $p(s, x, \tau, B)$ .

Также как и в полигауссовой модели общего вида (1), первая строка системы (2) определяет механизм смешивания.

В данной модели конкретизированный механизм смешивания основывается на марковском свойстве. Механизм смешивания характеризуется как марковский процесс реализации компонент смеси с заданными вероятностными свойствами.

Разработана классификация марково-смешанных случайных процессов. Конкретизируя фазовое пространство  $(\Psi, B)$  можно определить три класса марково-смешанных случайных процессов (м-смесей): дискретная м-смесь, непрерывная м-смесь, дискретно-непрерывная м-смесь. Рассмотрены типы состояний и соответствующие классы компонент дискретной м-смеси.

Рассмотрены вопросы имитации м-смешанных процессов, предложен метод компьютерного моделирования марково-смешанных полигауссовых (МС-ПГ) случайных процессов. Построение процедур имитации м-смешанных процессов основывается на определении (2). При этом в соответствии с определением (2) необходимо реализовать два уровня стохастической имитации:

- компонентный,
- событийный (смешивающий).

Первый уровень заключается в имитации системы гауссовских процессов, соответствующих гауссовским компонентам смешанной модели имитируемого процесса, он достаточно хорошо исследован в предшествующих работах по имитации смешанных случайных процессов.

Второй уровень фактически обеспечивает "сборку" результирующего смешанного процесса и представляет собой алгоритмическое обеспечение стохастического коммутатора. Определена структура процедуры имитации

МС-ПГ случайных процессов, в рамках которой раскрыто содержание стохастического коммутатора.

**Вторая глава** - "Оптимальные алгоритмы классификации негауссовских сигналов на основе марково-смешанных вероятностных моделей". В ней представлен метод синтеза алгоритмов проверки гипотез на основе марково-смешанных полигауссовых вероятностных моделей.

Пусть необходимо осуществить проверку гипотез  $H_j$ ,  $j = \overline{1, J}$  по результатам анализа многоэлементного вектора наблюдений  $\bar{u} = \bar{u}_1^K = \{\bar{u}_k, k = \overline{1, K}\}$ , включающего последовательно поступающие взаимосвязанные векторы статистик  $\bar{u}_k$ ,  $k = \overline{1, K}$ . Предположим, что условные распределения вектора наблюдения соответствующие каждой из возможных гипотез  $H_j$ ,  $j = \overline{1, J}$  описываются МС-ПГ вероятностными моделями, при этом в рамках каждого шага наблюдений флуктуации вектора статистик описываются полигауссовой вероятностной моделью:

$$w_j(\bar{u}_k) = \sum_{n_k^j=1}^{N_j} q_{n_k^j} N \left\{ \bar{u}_k, \bar{m}_{n_k^j}, \|\sigma_{n_k^j}\| \right\}, \quad (3)$$

$$q_{n_k^j}^j = \begin{cases} P(n_k^j | n_{k-m}^j, \dots, n_{k-1}^j) & k = \overline{\eta+1, K}, \\ P(n_k^j | n_1^j, \dots, n_{k-1}^j) & k = \overline{2, \eta}, \\ P(n_1^j), & k = 1, \end{cases} \quad (4)$$

а номера реализующихся гауссовских компонент  $n_k^j$  по шагам  $k = \overline{1, K}$  образуют дискретную цепь Маркова, заданную матрицами переходных вероятностей:

$$\|P^j\| = \left\{ P(n_k^j | n_{k-m}^j, \dots, n_{k-1}^j) \mid n_{k-m}^j, \dots, n_{k-1}^j = \overline{1, N_j} \right\}, \quad (5)$$

$$\|P_\mu^j\|_\mu = \left\{ P(n_\mu^j | n_1^j, \dots, n_{\mu-1}^j) \mid n_1^j, \dots, n_{\mu-1}^j = \overline{1, N_j} \right\}, \quad \mu = \overline{2, \eta}, \quad (6)$$

и векторами начальных вероятностей:

$$\bar{P}_1^j = \left\{ P(n_1^j) \mid n_1^j = \overline{1, N_j} \right\}. \quad (7)$$

Получен обобщенный алгоритм проверки гипотез на основе марково-смешанных вероятностных моделей:

$$j^* = \arg \max_j p(j|\bar{u}_1^k) = \arg \max_j p_j \Lambda_k^j, \quad (8)$$

$$\Lambda_k^j = \Lambda_{k-1}^j \sum_{n_k^j=1}^{N_j} q^j(n_k^j|\bar{u}_1^{k-1}) I_{n_k^j}^j(\bar{u}_k), \quad (9)$$

$$q^j(n_k^j|\bar{u}_1^{k-1}) = \begin{cases} \sum_{n_{k-\eta}^j=1}^{N_j} \dots \sum_{n_{k-1}^j=1}^{N_j} p(n_k^j|n_{k-\eta}^j, \dots, n_{k-1}^j) p(n_{k-\eta}^j, \dots, n_{k-1}^j|j, \bar{u}_1^{k-1}) & k = \overline{\eta+1, K} \\ \sum_{n_1^j=1}^{N_j} \dots \sum_{n_{k-1}^j=1}^{N_j} p(n_k^j|n_1^j, \dots, n_{k-1}^j) p(n_1^j, \dots, n_{k-1}^j|j, \bar{u}_1^{k-1}) & k = \overline{2, m}, \\ P(n_1^j), & k = 1. \end{cases} \quad (10)$$

$$p(n_{k-\eta}^j, \dots, n_{k-1}^j|j, \bar{u}_1^{k-1}) =$$

$$= \frac{\sum_{n_{k-\eta-1}^j=1}^{N_j} p(n_{k-1}^j|n_{k-\eta-1}^j, \dots, n_{k-2}^j) p(n_{k-\eta-1}^j, \dots, n_{k-2}^j|j, \bar{u}_1^{k-2}) I_{n_{k-1}^j}^j(\bar{u}_{k-1})}{\sum_{n_{k-m-1}^j=1}^{N_j} \dots \sum_{n_{k-1}^j=1}^{N_j} p(n_k^j|n_{k-\eta-1}^j, \dots, n_{k-2}^j) p(n_{k-\eta-1}^j, \dots, n_{k-2}^j|j, \bar{u}_1^{k-2}) I_{n_{k-1}^j}^j(\bar{u}_{k-1})}. \quad (11)$$

Полученный алгоритм (8)-(11) сочетает достоинства марковских и полигауссовых алгоритмов: с одной стороны, структура итоговых функционалов отношения правдоподобия (9) является рекуррентной, то есть они формируются последовательно, при этом на каждом шаге обработки в структуру функционалов отношения правдоподобия в неизменном виде входят их значения, соответствующие предыдущим наблюдениям и добавляются новые составляющие, зависящие только от текущей компоненты вектора наблюдения. С другой стороны, полигауссов характер исходных моделей позволяет "набрать" значения функционалов отношения правдоподобия (9) и апостериорных условных вероятностей компонент сигнала (11) из частных гауссовских функционалов отношения правдоподобия  $l_{k-1}^{**}(\bar{u}_k)$ .

В том случае, если анализируемые гипотезы  $H_j$ ,  $j = \overline{1, J}$  соответствуют принадлежности вектора наблюдения  $\bar{u}$  определенным

классам (типам) сигналов  $S_j$ ,  $j = \overline{1, J}$ , то полученный алгоритм, по существу, представляет собой обобщенный алгоритм классификации сигналов.

Представленный алгоритм является каноническим и позволяет выделить базовые блоки характерные для всех МС-ПГ-алгоритмов классификации: блок параллельной обработки (БПО), блоки рекуррентной обработки БРО<sub>1</sub> ... БРО<sub>J</sub>, соответствующие каждому из анализируемых классов, и решающий блок (РБ).

В блоке параллельной обработки реализуется набор однотипных стандартных операций, характерных для вычисления гауссовских функционалов отношения правдоподобия. Число параллельных каналов определяется числом гауссовских компонент в распределениях (3) т.е. объективной негауссовостью распределений анализируемых входных статистик. В блоках рекуррентной обработки в рамках рекуррентных процедур в значениях апостериорных вероятностей (11) гауссовских компонент аккумулируется информация о всех предшествующих наблюдениях и вычисляются итоговые функционалы отношения правдоподобия (9). В решающем блоке осуществляется принятие решения в соответствии с (8).

Таким образом, структура полученного алгоритма (8)-(11) является инвариантной к числу элементов вектора наблюдений  $\bar{u}$ , ее принципиальным атрибутом является сочетание свойств внутреннего параллелизма и рекуррентности, что обуславливает адекватность данного алгоритма реализации на базе современных устройств функциональной микроэлектроники, цифровых программно-аппаратных средств.

На основе марково-смешанной полигауссовой вероятностной модели многоэлементных сигналов синтезирован алгоритм обнаружения-различения флуктуирующих многоэлементных сигналов  $s_j(t)$ ,  $j = \overline{1, J}$  на фоне комплекса флуктуационных и негауссовских импульсных помех.

Дискретный многоэлементный сигнал  $s_j(t)$  представляет собой последовательность  $K$  элементарных сигналов  $s_{ijk}(t - t_k)$ ,  $i, j, k = \overline{1, I}$ , расположенных на временных позициях с координатами  $t_k$ ,  $t_k \in [0, T]$ ,  $k = \overline{1, K}$ . Конечное число типов элементарных сигналов равно  $I$  и может быть произвольным, элементарные сигналы  $s_{ijk}(t)$  могут отличаться любыми параметрами либо их совокупностями, в частности, начальными фазами, несущими частотами, длительностями, а также видами внутримпульсной модуляции. Сигналы такого типа широко используются во многих радиотехнических системах, а так же системах связи, передачи информации, сигналами такого вида могут быть представлены некоторые периодические биопотенциалы, используемые в медицинских диагностических системах (в частности, ЭКГ) и др.

Для вероятностного описания флуктуирующих многоэлементных сигналов используем МС-ПГ модель, в которой в рамках каждой  $k$ -й  $k = \overline{1, K}$  временной позиции флуктуации сигнала описываются полигауссовой вероятностной моделью типа (3), при этом номера реализующихся в процессе приема гауссовских компонент  $n_k$  по позициям  $k = \overline{1, K}$  образуют дискретную, в общем случае неоднородную, цепь Маркова, заданную матрицами переходных вероятностей  $\|P_k^j\| = \{P^j(n_k | n_{k-1}), n_k, n_{k-1} = \overline{1, N_j}\}$  и вектором начальных вероятностей  $\bar{P}_1^j = \{P^j(n_1), n_1 = \overline{1, N_j}\}$ . Прием многоэлементных сигналов осуществляется на фоне комплекса помех, включающего гауссовскую флуктуационную и негауссовскую импульсную помеху с произвольным заданным законом распределения вероятности.

Синтезированный алгоритм обнаружения-различения многоэлементных сигналов, являясь частным случаем обобщенного МС-ПГ алгоритма классификации (8)-(11), также сочетает свойства внутреннего параллелизма и рекуррентности, при этом имеет структуру инвариантную к числу элементов сигналов и виду распределений помех

Рассмотрены вопросы адаптации в условиях априорной неопределенности. Предложен алгоритм оценки параметров марково-смешанного распределения – вектора начальных вероятностей и матрицы переходных вероятностей в условиях априорной неопределенности. В предложенном алгоритме, оценка элементов переходной матрицы  $\|P_k\|$  и вектора начальных вероятностей  $\bar{P}_1$  осуществляется по совокупности частных гауссовских функционалов отношения правдоподобия  $1::(\cdot)$ , формируемых для основного ствола алгоритма обнаружения-различения многоэлементных сигналов, в котором вырабатывается решение о сигнале, то есть ствол адаптации естественно встраивается в структуру алгоритма приема многоэлементных сигналов.

Для нахождения вероятностных характеристик синтезированных в главе 2 алгоритмов приема многоэлементных сигналов и анализа динамики процесса адаптации использован метод статистического моделирования. Разработаны соответствующие компьютерные модели и программное обеспечение. При этом, для сравнительного анализа одновременно с МС-ПГ алгоритмом приема многоэлементных сигналов программно моделировались полигауссов алгоритм обнаружения, осуществляющий прием элементов сигнала без учета их взаимосвязи (ПГ-Н), полигауссов алгоритм приема, предполагающий дружный характер флуктуаций элементов сигнала (ПГ-Д), а также моногауссов алгоритм (МГ), в котором распределения сигнала и помех аппроксимировались гауссовским законом.

Проведенный методом статистического моделирования анализ подтвердил работоспособность синтезированных в главе 2 алгоритмов

приема МС-ПГ сигналов. При этом проиллюстрировано, что использование МС-ПГ моделей многоэлементных сигналов позволяет учесть взаимосвязь элементов сигнала, носящую промежуточный характер по отношению к случаям независимых и дружных флуктуаций, и обеспечить минимальную вероятность ошибки. Выигрыш в вероятности полной ошибки, обеспечиваемый МС-ПГ алгоритмом по отношению к ПГ-Н и ПГ-Д алгоритмам в конкретных ситуациях составляет порядка 20%, по отношению МГ алгоритму вероятность полной ошибки уменьшается в 4 раза. Синтезированный для случая отсутствия априорной информации о значениях вектора начальных вероятностей  $\bar{P}_1$  и переходной матрицы сигнала  $\|P_k\|$  адаптивный алгоритм приема формирует оценки, имеющие удовлетворительное приближение к истинным значениям после приема порядка 200 сигналов.

Проведен сопоставительный анализ сложности алгоритмов обработки многоэлементных сигналов, построенных на основе полигауссовой модели общего вида и МС-ПГ – вероятностной модели. В настоящей работе в качестве меры сложности алгоритмов обработки многоэлементных сигналов приняты количество и размерности базовых операций необходимых для их реализации.

Результаты анализа свидетельствуют, что полигауссов алгоритм обнаружения-различения многоэлементных сигналов имеет структуру зависящую от количества элементов входного многоэлементного сигнала  $K$ . От  $K$  по закону близкому к показательному зависит количество операций вычисления частных гауссовских функционалов отношения правдоподобия, умножения, а также размерность операций суммирования. Кроме того, размерность операций вычисления частных гауссовских функционалов отношения правдоподобия линейно зависит от  $K$ . В силу этого, при относительно небольшом  $K$  (10 – 20) объем требуемых вычислений резко возрастает, делая ПГ- алгоритм нереализуемым.

Показано, что размерность и количество базовых операций предлагаемого МС-ПГ алгоритма (операций вычисления частных гауссовских функционалов отношения правдоподобия, умножения и суммирования) не зависит от количества элементов входного сигнала  $K$ . При этом количество операций вычисления частных гауссовских функционалов отношения правдоподобия, умножения и суммирования определяется количеством типов обрабатываемых сигналов  $J$ , числом гауссовских компонент в распределениях сигналов  $N_j$  и помехи  $N_n$ .

Таким образом, структура синтезированного МС-ПГ алгоритма обнаружения-различения многоэлементных сигналов является инвариантной к числу элементов сигналов и виду распределений помех, при этом на каждом шаге обработки в парциальных каналах алгоритма вычисляются относительно малоразмерные (соответствующие одному элементу сигнала)

частные гауссовские функционалы отношения правдоподобия. Это обуславливает возможность эффективной реализации получаемых в рамках предлагаемого подхода алгоритмов на основе современных устройств функциональной микроэлектроники, цифровых программно-аппаратных средств.

*Третья глава* носит название «Марково-смешанные вероятностные модели в задаче последовательной проверки гипотез». В ней рассмотрены вопросы применения марково-смешанных вероятностных моделей в задаче последовательной проверки гипотез.

Последовательное усеченное байесовское правило принятия решений, имеет вид:

$$d_k^0(\bar{T}(\bar{u}_1^k)) = \begin{cases} d_{k3}^0, & R_{kn}^K(\bar{u}_1^k) \geq R_k^0(\bar{u}_1^k) \\ d_n, & R_{kn}^K(\bar{u}_1^k) < R_k^0(\bar{u}_1^k) \end{cases}, k = \overline{1, K-1}, \quad (12)$$

$$d_K^0(\bar{T}(\bar{u}_1^K)) = d_{k3}^0,$$

где:  $d_k(\cdot)$  - решающие функции, конкретными значениями которых являются решения из множества возможных решений  $D_k$ ,  $D_k = D_{k3} \cup d_n$  включающего окончательные (заключительные) решения  $d_{k3}$  и решения о продолжении наблюдений  $d_n$ ;

$d_{k3}^0$  - решение, обеспечивающее инфимум апостериорного риска  $R_k(\bar{u}_1^k, d_{k3})$ ;

$\bar{T}_k = \bar{T}(\bar{u}_1^k)$  - векторная статистика.

Обоснован вид достаточных статистик в задаче последовательной проверки гипотез. Доказано, что если распределение наблюдений  $w(\bar{u}_1^k)$  подчинятся МС-ПГ вероятностному закону, то в (12) векторная статистика в виде вектора апостериорных вероятностей гауссовских компонент и вектора частных гауссовских функционалов отношения правдоподобия

$$T_k = \bar{P}_k(n_k | \bar{l}(\bar{u}_k)) = \{P(n_k | \bar{l}(\bar{u}_k)), n = \overline{1, N_k}\} \quad (13)$$

является достаточной статистикой.

Получен алгоритм последовательной проверки двух гипотез. Алгоритм включает в себя блок параллельной обработки в котором параллельно вычисляются частные функционалы отношения правдоподобия  $l_k^*(\bar{u}_k)$ , блок рекуррентной обработки, блок вычисления порогов и блок пороговой обработки. Представленный алгоритм, также как и алгоритмы синтезированные в главе 2, сочетая свойства внутреннего параллелизма и рекуррентности, является адекватным реализации на основе современной элементной базы.

**Четвертая глава** - «Помехоустойчивые алгоритмы приема многоэлементных сигналов радиотехнических систем, функционирующих при комплексе помех». В данной главе обобщенные алгоритмы обработки многоэлементных сигналов, полученные в главе 2 конкретизируются применительно к радиотехническим системам.

Синтезированы оптимальные алгоритмы обработки многоэлементных радиоимпульсных сигналов в комплексе шумовых и хаотических импульсных помех. При этом используются квазидетерминированные модели многоэлементных сигналов и импульсных помех в которых случайными параметрами являются соответственно амплитудные множители  $-a_k^j, b_k^n$  и начальные фазы  $\varphi_k^j, \Phi_{nk}$ .

Произвольные распределение амплитуд радиоимпульсных многоэлементных сигналов представлены в виде марково-смешанной полирайсовой (МС-ПР) вероятностной модели:

$$w^j(a_k^j) = \sum_{n_k^j=1}^{N_j} q_{n_k^j}^j \frac{a_k^j}{(\sigma_{n_k^j}^j)^2} \exp \left[ -\frac{(a_k^j)^2 + (m_{n_k^j}^j)^2}{2(\sigma_{n_k^j}^j)^2} \right] I_0 \left( \frac{a_k^j m_{n_k^j}^j}{(\sigma_{n_k^j}^j)^2} \right), \quad (14)$$

в которой как и в (3) номера реализующихся компонент  $n_k^j$  представляют собой дискретную цепь Маркова с вектором начальных вероятностей  $\bar{P}_1^j$  и переходной матрицей  $\|\bar{P}_k^j\|$ .

Синтезированный алгоритм обнаружения-различия многоэлементных радиоимпульсных сигналов имеет структуру аналогичную алгоритмам полученным в главе 2, при этом конкретизируется вид взвешенных функционалов отношения правдоподобия  $L^{**}(\bar{u}_k)$  и входящих в них частных функционалов отношения правдоподобия  $l^{**}(\bar{u}_k)$ . Одной из основной операцией, выполняемой при вычислении частных функционалов отношения правдоподобия  $l^{**}(\bar{u}_k)$  является вычисление дискретных корреляционных интегралов  $z^{**}(\cdot)$ . Показано, что при этом все множество комбинационных дискретных корреляционных интегралов  $z^{**}(\cdot)$ , соответствующее всевозможным комбинациям номеров компонент распределений сигналов и помех, формируется из относительно небольшого числа базовых - «сигнальных»  $z^{ijk}(\bar{u}_k)$ ,  $z_{\perp}^{ijk}(\bar{u}_k)$  и «помеховых» -  $z^n(\bar{u}_k)$ ,  $z_{\perp}^n(\bar{u}_k)$  корреляционных интегралов.



В главе 2 синтезирован обобщенный алгоритм обработки многоэлементных сигналов, заданных МС-ПГ вероятностными моделями. При этом был рассмотрен самый общий случай, когда каждый многоэлементный сигнал обладал специфическим характером взаимосвязи элементов, определяемым соответствующей матрицей переходных вероятностей  $\|p_k\|, k = \overline{1, J}$ . Неизбежной платой за указанную универсальность является то, что число блоков рекуррентной обработки в обобщенном алгоритме обработки многоэлементных сигналов равно числу анализируемых многоэлементных сигналов  $J$ .

Однако существует широкий класс приложений, в которых анализируются протяженные многоэлементные сигналы с большим числом элементов  $K$ , формируемые единым источником и прошедшие по единому каналу связи. При этом характер взаимосвязи элементов является одинаковым для всего ансамбля анализируемых многоэлементных сигналов  $s = \{s_j(t), j = \overline{1, J}\}$ . Для указанного класса приложений рассмотрены вопросы построения алгоритмов приема многоэлементных сигналов с уменьшенным числом блоков рекуррентной обработки. Получены алгоритмы приема многоэлементных сигналов с поэлементным принятием решений числом блоков рекуррентной обработки которых не зависит от числа анализируемых многоэлементных сигналов  $J$ , а зависит только от числа элементарных сигналов  $I$ .

Разработаны соответствующие компьютерные модели и проведен сравнительный анализ полученных алгоритмов методом статистического моделирования. Результаты моделирования свидетельствуют о том, что полученные алгоритмы позволяют учесть взаимосвязь элементов сигнала, носящую промежуточный характер по отношению к случаям независимых и дружных флуктуаций, и обеспечить минимальную вероятность ошибки. Выигрыш в вероятности ошибки на элемент сигнала, обеспечиваемый МС-ПГ алгоритмом приема с поэлементным принятием решений по отношению к ПГ-Н и ПГ-Д алгоритмам в конкретных ситуациях составляет порядка 40%, по отношению МГ алгоритму вероятность ошибки уменьшается в 5 раз.

Рассмотрены вопросы синтеза одноканальных многоотсчетных алгоритмов обработки дружно флуктуирующих негауссовских многоэлементных сигналов на фоне шумовых и хаотических импульсных помех.

Разработаны многоотсчетные последетекторные алгоритмы обработки многоэлементных сигналов "в целом". На основе получившего развитие метода построения многомерных распределений откликов блока детекторов разработаны алгоритмы совместной амплитудно-фазовой и амплитудной обработки сигналов на фоне комплекса помех. Построены соответствующие многомерные зоны принятия решений и определены вероятностные характеристики. Показано, что при воздействии комплекса шумовых и

импульсных помех совместная амплитудно-фазовая обработка обеспечит максимальную помехоустойчивость по отношению к амплитудной и фазовой.

Разработаны многоотсчетные последетекторные алгоритмы обработки дружно флуктуирующих многоэлементных сигналов, основанные на двухэтапной процедуре: обнаружение синхрогрупп с оценкой уровня сигнала и условной поэлементной обработке позиций информационных групп. Разработаны алгоритмы совместной амплитудно-фазовой и амплитудной обработки сигналов информационных групп при различных структурах вектора наблюдения.

Разработано программное обеспечение моделирующее полученные и известные алгоритмы приема многоэлементных сигналов. Результаты сравнительного анализа свидетельствуют о том, что предлагаемые алгоритмы позволяют снизить вероятность полной ошибки в конкретных ситуациях на 20-30%.

**П я т а я   г л а в а** - «Вопросы практической реализации помехоустойчивой обработки многоэлементных сигналов». В ней рассмотрены вопросы использования современной элементной базы при реализации помехоустойчивых способов обработки сигналов. Представлены оригинальные устройства обработки многоэлементных сигналов, сформулированы практические рекомендации по построению подобных устройств на современной элементной базе.

**Ш е с т а я   г л а в а** - «Марково-смешанные полигауссовы вероятностные модели в теории обработки электрокардосигналов». Марково-смешанные вероятностные модели и методы могут быть плодотворно использованы в широком классе приложений, в частности, связанных с обработкой и анализом биоэлектрических сигналов. В качестве примера в работе рассмотрены вопросы использования марково-смешанных полигауссовых вероятностных моделей и методов в задачах описания электрокардосигналов (ЭКС) и оптимизации алгоритмического обеспечения медицинских диагностических кардиосистем реализующих методы электрокардиографии высокого разрешения (ЭКГ-ВР).

В настоящее время прогресс в области электроники, компьютерных и информационных технологий выводит электрокардиографию на качественно новый уровень развития. Возрастающая вычислительная производительность аппаратуры медицинских диагностических комплексов позволяет реализовывать все более сложные процедуры обработки электрокардосигналов, что, в свою очередь, обуславливает развитие новых методов диагностики, изначально ориентированных на использование мощных компьютерных средств обработки кардосигналов. К этим методам относятся методы электрокардиографии высокого разрешения (ЭКГ-ВР). Эти методы в последнее время получают все более широкое развитие, поскольку они позволяют выявлять и анализировать низкоамплитудные кардосигналы, недоступные для анализа при использовании традиционных методов

регистрации ЭКГ и содержащие важную диагностическую информацию. Суть методов ЭКГ-ВР основана на усреднении множества идентичных кардиоциклов, которое позволяет выделить низкоамплитудные полезные сигналы из шумов.

Одна из важных областей применения ЭКГ-ВР – выявление потенциалов замедленной деполяризации миокарда, так называемых поздних потенциалов желудочков сердца (ППЖ). Наличие ППЖ на ЭКС уазывает на повышенный риск возникновения аритмий сердца, в том числе угрожающих жизни пациента.

Между тем, методы ЭКГ-ВР, в основу которых положено усреднение кардиосигналов, по существу, основываются на корреляционных моделях и методах обработки случайных сигналов, предполагающих гауссовский характер флуктуаций анализируемых сигналов и мешающих факторов. Однако, в практике электрокардиографии это не выполняется. Реальные кардиосигналы представляют собой случайные процессы характеризующиеся сложным, нестандартным характером флуктуаций как в рамках отдельных кардиоциклов, так и взаимосвязью флуктуаций смежных кардиоциклов. В этих условиях использование методов обработки так называемого «корреляционного этапа» не позволяет в полной мере выделять диагностическую информацию, объективно присутствующую в кардиосигнале. В частности, недостатком существующего метода анализа ППЖ (метода Симсона) является возможность попадания в усредняемый сигнал различных аритмий, например, экстрасистол, что приводит к искажению усредненного кардиосигнала и не позволяет достоверно выделять ППЖ.

Предложена МС-ПГ вероятностная модель ЭКС, обеспечивающая адекватное описание как флуктуаций ЭКС в рамках каждого кардиоцикла, так и взаимосвязь флуктуаций различных кардиоциклов. На основе МС-ПГ вероятностной модели ЭКС синтезирован оптимальный алгоритм классификации кардиоциклов.

Разработана структура алгоритмического обеспечения диагностического кардиокомплекса. Процедура классификации осуществляет группирование кардиоциклов по классам, после чего кардиоциклы одного класса подаются в соответствующий блок анализа ППЖ по стандартному методу Симсона. Классификация кардиоциклов перед процедурой анализа ППЖ по методу Симсона позволяет избежать усреднения разнородных кардиоциклов и искажения результирующего усредненного кардиоцикла. При этом осуществляется многоканальный анализ на ППЖ методом Симсона, где в каждом из каналов анализируются кардиоциклы одного из выявленных классов.

Кроме того, на основе процедуры классификации может быть выделена дополнительная диагностическая информация, в частности матрица переходных вероятностей  $\|P\|$ , характеризующая взаимосвязь

смежных кардиоциклов, которая учитывается при детальном анализе аритмий сердца.

**В заключение** сведены основные научные и практические результаты проведенного исследования.

### 3. ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

- Предложен, адекватно формализован и описан новый класс марково-смешанных случайных процессов. Марково-смешанные вероятностные модели случайных процессов на основе двухуровневого представления смешанных процессов органически сочетают свойства смешанных и марковских моделей. В определении марково-смешанных моделей случайных процессов компонентный уровень описывается также, как и в известных смешанных моделях и содержит систему стандартных (в частности, гауссовских) процессов. Смешивающий уровень конкретизируется заданием марковского процесса, определяющего события заключающиеся в последовательной реализации компонент смешанного процесса.
- Предложен новый метод синтеза оптимальных алгоритмов классификации сигналов на основе марково-смешанных вероятностных моделей.
- Получена каноническая форма обобщенного МС-ПП алгоритма классификации сигналов, сочетающего достоинства полигауссовых и марковских алгоритмов, обладающего свойствами внутреннего параллелизма и рекуррентности. Алгоритм содержит следующие базовые блоки: блок параллельной обработки, блоки рекуррентной обработки, решающий блок.
- Развита в диссертации методология статистического синтеза, позволяет аналитически синтезировать алгоритмы обработки многоэлементных сигналов, изначально основанные на однотипном наборе стандартных операций и обладающие структурами, инвариантными к числу элементов сигналов и виду распределений помех, что обуславливает возможность их эффективной реализации на основе современных устройств функциональной микроэлектроники, цифровых программно-аппаратных средств. Получено аналитическое решение задачи оптимального обнаружения-различения флуктуирующих многоэлементных сигналов на фоне комплекса негауссовских помех. Структура синтезированного алгоритма обнаружения-различения сочетает свойства внутреннего параллелизма и рекуррентности, является инвариантной к числу

элементов сигналов и виду распределений помех, при этом на каждом шаге обработки в парциальных каналах алгоритма вычисляются относительно малоразмерные (соответствующие одному элементу сигнала) частные гауссовские функционалы отношения правдоподобия.

- Разработан алгоритм оценивания параметров марково-смешанной вероятностной модели многоэлементных сигналов в условиях априорной неопределенности. В условиях априорной неопределенности алгоритм обработки многоэлементных сигналов дополняется стволом адаптации, в котором по частным гауссовским функционалам отношения правдоподобия формируются оценки элементов переходной матрицы и вектора начальных вероятностей.
- Разработан метод компьютерного моделирования марково-смешанных полигауссовых случайных процессов с требуемыми внутренними взаимосвязями для проведения исследований алгоритмов обработки многоэлементных сигналов методом статистического моделирования. Разработаны соответствующие компьютерные модели и программное обеспечение.
- Проведено статистическое моделирование, свидетельствующее о работоспособности и эффективности полученных алгоритмов. Выигрыш в вероятности полной ошибки, обеспечиваемый МС-ПГ алгоритмом обнаружения-различения многоэлементных сигналов по отношению к ПГ-Н и ПГ-Д алгоритмам в конкретных ситуациях составляет порядка 20%, по отношению к МГ алгоритму вероятность полной ошибки уменьшается в 4 раза.
- МС-ПГ модели являются эффективным инструментом ограничения размерности задач последовательного принятия решений при нестандартных распределениях вектора наблюдения. Определен и обоснован вид достаточной статистики для задачи последовательной проверки гипотез в виде вектора апостериорных вероятностей гауссовских компонент и вектора частных гауссовских функционалов отношения правдоподобия.
- Синтезирована обобщенная структура алгоритма последовательной проверки двух гипотез в негауссовской постановке. Показано, что структура алгоритма сочетает свойства внутреннего параллелизма и рекуррентности и является адекватной реализации на основе современной элементной базы.

- На основе квазидетерминированных моделей сигналов и помех решена задача синтеза алгоритма обнаружения-различения радиоимпульсных многоэлементных сигналов с МС-ПР распределениями амплитуд на фоне комплекса шумовых и хаотических импульсных помех. Структура алгоритма сочетает свойства внутреннего параллелизма и рекуррентности и независимо от вида распределений сигналов и помех содержит конечный набор типовых линейных и нелинейных операций, характерных для вычисления райсовских функционалов отношения правдоподобия. В полученном алгоритме все множество комбинационных дискретных корреляционных интегралов  $z_{jk}^{**}(\cdot)$ , соответствующее всевозможным комбинациям номеров компонент распределений сигналов и помех, формируется на основе относительно небольшого числа базовых – «сигнальных»  $z^{jk}(\bar{u}_k), z_{\perp}^{jk}(\bar{u}_k)$  и «помеховых» –  $z^{\perp}(\bar{u}_k), z_{\perp}^{\perp}(\bar{u}_k)$  корреляционных интегралов. Таким образом существенно сокращается число операций, выполняемых на радиочастоте.
- Показано, что в случае если отличия матриц переходных вероятностей анализируемых многоэлементных сигналов обусловлены только отличиями типов элементарных сигналов, то на основе МС-ПР (МС-ПР) моделей возможно построение алгоритмов обработки многоэлементных сигналов с поэлементным принятием решений, число блоков рекуррентной обработки которых меньше числа типов анализируемых многоэлементных сигналов. Получены алгоритмы обработки многоэлементных сигналов с поэлементным принятием решений. В данных алгоритмах число блоков рекуррентной обработки определяется числом элементарных сигналов  $I$  и не зависит от числа анализируемых многоэлементных сигналов  $J$ .
- Проведен сравнительный анализ алгоритмов обработки многоэлементных сигналов с поэлементным принятием решений методом статистического моделирования. Результаты моделирования свидетельствуют о том, что полученные алгоритмы позволяют учесть взаимосвязь элементов сигнала, несущую промежуточный характер по отношению к случаям независимых и дружных флуктуаций, и обеспечить минимальную вероятность ошибки. Выигрыш в вероятности ошибки на элемент сигнала, обеспечиваемый МС-ПР алгоритмом приема многоэлементных сигналов с поэлементным принятием решений по отношению к ПР-Н и ПР-Д алгоритмам в конкретных ситуациях составляет порядка 40%, по отношению МР алгоритму вероятность ошибки уменьшается в 5 раз.
- Разработаны многоотсчетные последетекторные алгоритмы обработки многоэлементных радиоимпульсных сигналов в целом. На основе

усовершенствованного метода построения многомерных распределений откликов блока детекторов разработаны алгоритмы совместной амплитудно-фазовой и амплитудной обработки сигналов на фоне комплекса помех. Построены соответствующие многомерные зоны принятия решений и определены вероятностные характеристики. Показано, что при воздействии комплекса шумовых и хаотических радиоимпульсных помех совместная амплитудно-фазовая обработка обеспечивет максимальную помехоустойчивость по отношению к амплитудной и фазовой.

- Разработаны многоотсчетные последетекторные алгоритмы условного поэлементного приема дружнофлуктуирующих многоэлементных радиоимпульсных сигналов на фоне шумовых и хаотических радиоимпульсных помех. Проведена компьютерное моделирование полученных алгоритмов. Результаты сравнительного анализа свидетельствуют о том, что предлагаемые алгоритмы позволяют снизить вероятность полной ошибки в конкретных ситуациях на 20-30%.
- Получены оригинальные технические решения помехоустойчивых устройств приема многоэлементных радиосигналов, сформулированы практические рекомендации по построению подобных устройств на современной элементной базе.
- Предложена марково-смешанная полигауссова вероятностная модель электрокардиосигналов, обеспечивающая адекватное описание как флуктуаций электрокардиосигналов в рамках каждого кардиоцикла, так и взаимосвязь флуктуаций различных кардиоциклов. Получен алгоритм классификации кардиоциклов, адекватный реализации в современных диагностических кардиокомплексах.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих печатных работах:

1.Надеев А.Ф., Чабдаров Ш.М., Файзуллин Р.Р. Синтез адаптивного алгоритма и мультипроцессорной системы разрешения произвольно флуктуирующих сигналов и помех// 44-я Всесоюзная научная сессия, посвящ. Дню радио: Тез.докл. Часть I. М.: Радио и связь, 1989. С.69:

2.Надеев А.Ф., Чабдаров Ш.М., Файзуллин Р.Р.,Волков А.Н. и др. Мультипроцессорная реализации полигауссового адаптивного алгоритма полного разрешения сигналов на фоне комплекса помех// Статистический синтез и анализ информационных систем: Тез. докл. XI Всесоюзного научн.-техн. семинара. Ульяновск, 1989. Часть 1. С.8-9.

3.Надеев А.Ф., Чабдаров Ш.М., Файзуллин Р.Р., Щербакова Т.Ф., Волков А.Н. Модели и методы синтеза специализированных цифровых процессоров разрешения сигналов реального времени и анализ их производительности// Методы и микроэлектронные средства цифрового преобразования и обработки сигналов: Тез. докл. Всесоюзной НТК. ИЭВТ АН Латв.ССР. Рига, 1989. Т.1.С.147.

4.Надеев А.Ф., Чабдаров Ш.М., Файзуллин Р.Р., Хасанов Р.И. Синтез и анализ мультипроцессорной системы полного разрешения произвольно флуктуирующих сигналов и полей: Тез.докл. Всес. Науч.-техн. конф. Харьков-Туапсе, 1989. С.36.

5.Надеев А.Ф., Щербакова Т.Ф., Щибалев В.С., Файзуллин Р.Р., Шакиров Н.Т., Гаманилов М.А., Култынов Ю.И. Устройство селекции импульсных последовательностей по амплитуде и временному положению на микропроцессорах// Состояние и перспективы развития основных направлений радиотехнологии и спецмашиностроения: Тез.докл. отраслевой НТК Минрадиопрома ССР. Казань, 1989. С.100.

6.Надеев А.Ф., Чабдаров Ш.М., Файзуллин Р.Р. Полигауссова обработка флуктуирующих многопозиционных сигналов при комплексе помех// Проектирование, испытание и эксплуатация систем вторичной радиолокации УВД и систем предупреждения столкновения воздушных судов: Тез. докл. Всесоюзной НТК. Новгород, 1989. С.17.

7.Надеев А.Ф., Чабдаров Ш.М., Файзуллин Р.Р. Полигауссов обнаружитель многопозиционных сигналов в комплексе помех// Развитие и внедрение новой техники радиоприемных устройств и обработки сигналов: Тез.докл. Всесоюзной НТК. М.: Радио и связь, 1989. С.43.

8.Надеев А.Ф., Чабдаров Ш.М., Файзуллин Р.Р., Рахимов Р.Х. Синтез полигауссовых алгоритмов оптимального приема дискретных сигналов при комплексе помех// Методы представления и обработки случайных сигналов и полей. Сборник докладов республ. школы-семинара. ХИРЭ. Харьков, 1990.С.12-17.

9.Надеев А.Ф., Чабдаров Ш.М., Файзуллин Р.Р. Моделирование помехоустойчивых полигауссовых алгоритмов в комплексе негауссовских помех// Компьютерные методы исследования проблем теории и техники передачи дискретных сигналов по радиоканалам: Тез.докл. 1-й Всесоюзной НТК. М.: Радио и связь, 1990. С.52.

10.Надеев А.Ф., Чабдаров Ш.М., Феоктистов А.Ю., Файзуллин Р.Р. Оптимальный прием многопозиционных сигналов при комплексе шумовых и импульсных помех с произвольными флуктуациями// Радиотехника, 1990. №12. С.32-35.

11.Надеев А.Ф., Чабдаров Ш.М., Феоктистов А.Ю., Файзуллин Р.Р. Многоотсчетная совместная обработка многопозиционных сигналов при комплексе негауссовских помех// Радиоэлектроника, 1991. №1. С.71-75. (Изв. высш. учебн. заведений).



12.Надеев А.Ф., Чабдаров Ш.М., Файзуллин Р.Р. Помехоустойчивая обработка дискретных произвольно флуктуирующих сигналов в комплексе помех на основе полигауссовых моделей// Информационные методы повышения эффективности и помехоустойчивости радиосистем и систем связи: Тез.докл. Всесоюзной НТК. Ташкент, 1990. С.81.

13.Надеев А.Ф.,Чабдаров Ш.М., Феоктистов-А.Ю., Каминский М.Б. Селектирующее устройство декодирования. Авторское свидетельство №1305867. Оpubл. 23.04.87.Бюл.№15.

14. Надеев А.Ф.,Чабдаров Ш.М.,Феоктистов А.Ю., Бухмин В.С. Устройство для приема и декодирования последовательности импульсно-временных кодов. Авторское свидетельство №1336079. Оpubл. 07.09.87. Бюл. №3.

15. Надеев А.Ф.,Чабдаров Ш.М.,Феоктистов А.Ю. Бухмин В.С., Фаткуллин Д.Г. Устройство для приема последовательности импульсно-временных кодов. Авторское свидетельство №1483477. Оpubл.30.05.89. Бюл. №20.

16. Надеев А.Ф., Чабдаров Ш.М., Феоктистов А.Ю. Устройство для приема последовательности импульсно-временных кодов. Авторское свидетельство №1483478. Оpubл. 30.05.89. Бюл. №20.

17.Надеев А.Ф., Чабдаров Ш.М., Феоктистов А.Ю., Лепехов В.А. Устройство обработки последовательности радиосигналов на поверхностных акустических волнах. Авторское свидетельство №1669371 от 08.04.91.

18.Надеев А.Ф., Чабдаров Ш.М., Феоктистов А.Ю., Лепехов В.А. Устройство обработки последовательности радиосигналов на поверхностных акустических волнах. Авторское свидетельство №1672910 от 22.04.91.

19.Надеев А.Ф., Чабдаров Ш.М., Феоктистов А.Ю., Лепехов В.А., Файзуллин Р.Р. Устройство для декодирования импульсно-временных кодов. Авторское свидетельство №1580565. Оpubл. 23.07.90. Бюл.№27.

20.Надеев А.Ф., Чабдаров Ш.М., Феоктистов А.Ю., Лепехов В.А.,Файзуллин Р.Р., Волков А.Н. Устройство различения сигналов на фоне произвольной помехи. Авторское свидетельство №1596469. Оpubл. 30.09.90. Бюл. №36.

21.Надеев А.Ф., Чабдаров Ш.М., Феоктистов А.Ю., Лепехов В.А., Файзуллин Р.Р., Волков А.Н. Устройство различения сигналов на фоне произвольной помехи. Авторское свидетельство №1826840. Оpubл. 13.10.92. Бюл. №18.

22.Надеев А.Ф., Чабдаров Ш.М., Файзуллин Р.Р., Козлов С.В. Устройство для декодирования импульсно-временных сигналов. Патент РФ №2028732. от 09.02.95.

23.Надеев А.Ф., Чабдаров Ш.М., Файзуллин Р.Р., Рахимов Р.Х. Использование однородных вычислительных сред в решении задач обработки многопозиционных сигналов систем идентификации подвижных

объектов// Однородные вычислительные системы: Тез. докл. Всерос. НТК. М.:1993. С.19.

24.Надеев А.Ф., Чабдаров Ш.М., Файзуллин Р.Р., Рахимов Р.Х. Методы и средства обработки многопозиционных сигналов на основе однородных вычислительных сред в системах идентификации подвижных объектов.//Фазированные антенные решетки и перспективные средства связи: Тез докл. Всерос. НТК. Казань, 1994. С.168-169.

25.Надеев А.Ф., Чабдаров Ш.М., Файзуллин Р.Р., Рахимов Р.Х. Полигауссово-марковские алгоритмы и мультитранспьютеры обработки сигналов систем идентификации подвижных объектов// 50-научная сессия, посв. Дню радио: Тез. докл. М.: Радиотехника, 1995. Ч.II. С.199-200.

26.Надеев А.Ф., Чабдаров Ш.М., Файзуллин Р.Р., Рахимов Р.Х., Мальцев Е.Ф. Синтез алгоритмов идентификации подвижных объектов в условиях воздействия комплекса помех и дестабилизирующих факторов// Распознавание образов и анализ изображений. Новые информационные технологии: Тез. докл. Всероссийской НТК. Ульяновск, 1995. Ч.2. С.50-52.

27.Надеев А.Ф., Чабдаров Ш.М., Файзуллин Р.Р., Рахимов Р.Х., Мальцев Е.Ф. Синтез алгоритмов и программно-аппаратных средств идентификации подвижных объектов в условиях воздействия мешающих помех и дестабилизирующих факторов// Теория и техника передачи, приема и обработки информации: Тез. докл. Международной НТК. Харьков, 1995. С.67-69.

28.Надеев А.Ф., Чабдаров Ш.М., Файзуллин Р.Р., Мальцев Е.Ф., Шафигуллин М.И. Синтез помехоустойчивых алгоритмов и процессоров обработки дискретных сигналов в комплексе негауссовских помех// Труды Всероссийской конференции "Направления развития систем и средств связи". Воронеж. 1996. Т.2 С.710-719.

29. Надеев А.Ф., Чабдаров Ш.М., Феоктистов А.Ю., Файзуллин Р.Р., Рахимов Р.Х., Мальцев Е.Ф., Шафигуллин М.И. Синтез алгоритмов обработки сигналов в условиях воздействия комплекса помех и дестабилизирующих факторов в системах идентификации подвижных объектов// 51-я Научн. сессия посвященная Дню радио: Тез. докл. М.: 1996. Ч.II. С.151-152.

30. Надеев А.Ф., Чабдаров Ш.М., Файзуллин Р.Р., Рахимов Р.Х., Козлов С.В. Алгоритмы и специпроцессоры обработки сигналов в радиопереносных САЭО// Радиоэлектронные устройства и системы. Межвузовский сб. научн. Трудов. КГТУ им. А.Н.Туполева. Казань. 1996. С.4-16.

31.Надеев А.Ф., Рахимов Р.Х., Файзуллин Р.Р., Мальцев Е.Ф., Шафигуллин М.И. Мультипроцессорная реализация блоков обработки сигналов запросчиков системы управления воздушным движением// Экраноплан-96: Тез. докл. Международной конференции. Казань, 1996. С.140-141.

32.Надеев А.Ф., Файзуллин Р.Р., Рахимов Р.Х., Марчук В.Я. Применение современных программируемых структур с повышенной дефекто- и отказоустойчивостью в системах связи и обработки информации: Учебное пособие/ Изд-во Казан. гос. техн. ун-та. 1996. 76 с.

33.Надеев А.Ф., Чабдаров Ш.М., Файзуллин Р.Р., Рахимов Р.Х., Феоктистов А.Ю. Статистические модели и методы обработки сигналов в системах радиосвязи: Учебное пособие./Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та. 1997. 90 с.

34.Надеев А.Ф., Чабдаров Ш.М., Шафигуллин М.И., Помехоустойчивый алгоритм обработки пачек многопозиционных сигналов// 52-я Научная сессия, посвященная Дню радио: Тез докл. Москва, 1997. ЧП. С.64-65.

35.Надеев А.Ф., Чабдаров Ш.М., Феоктистов А.Ю.Файзуллин Р.Р., Рахимов Р.Х., Мальцев Е.Ф., Шафигуллин М.И. Синтез помехоустойчивого алгоритма обработки пачек многопозиционных сигналов в комплексе негауссовских помех//Вестник КГТУ им А.Н.Туполева, 1998. №1. С.29-31.

36.Надеев А.Ф., Чабдаров Ш.М., Файзуллин Р.Р. Модели и методы на основе вероятностных смесей с марковостью в задачах оптимизации алгоритмического обеспечения информационных систем// 53-я Научная сессия, посвященная Дню радио: Тез докл. Москва, 1998. С.213.

37. Надеев А.Ф., Чабдаров Ш.М., Файзуллин Р.Р., Рахимов Р.Х., Мальцев Е.Ф., Шафигуллин М.И., Егоров А.Е. Структурно-стохастический подход к задаче распознавания сложных сигналов в системах идентификации объектов// Вестник КГТУ им А.Н.Туполева, 1998. №2. С7-12.

38. Надеев А.Ф., Чабдаров Ш.М., Файзуллин Р.Р., Сенюшин А.О., Фалин В.Г. Марково смешанные полигауссовы модели в задачах оптимизации алгоритмического обеспечения информационных систем// 54-я Научная сессия, посвященная Дню радио: Тез.докл. Москва, 1999. С.229-230.

39. Надеев А.Ф., Чабдаров Ш.М., Файзуллин Р.Р., Сенюшин А.О., Фалин В.Г. Марково смешанные полигауссовы модели случайных процессов// Труды V Международной НТК «Радиолокация, навигация, связь». Воронеж, 1999. Т.1. С.6-11.

40.Надеев А.Ф.; Валеев А.К., Урецкий Я.С., Файзуллин Р.Р. Оптимизация регионального частотно-территориального планирования// XIX Всероссийская научная конференция «Распространение радиоволн»: Тез.докл. Казань, 1999.С.14.

Кроме того, следующие статьи, подготовленные лично Надеевым А.Ф., приняты редакцией центрального журнала к публикации и находятся в печати:

41.Надеев А.Ф. Марково-смешанные полигауссовы вероятностные модели случайных процессов// Телекоммуникации. 2000.№1. В печати.

42.Надеев А.Ф. Синтез обобщенного алгоритма проверки гипотез на основе марково-смешанных полигауссовых вероятностных моделей// Телекоммуникации. 2000.№1. В печати.

43.Надеев А.Ф. Обнаружение-различение многоэлементных сигналов при комплексе негауссовских помех// Телекоммуникации. 2000. №2. В печати.

44.Надеев А.Ф. Марково-смешанные вероятностные модели в задаче последовательной проверки гипотез// Телекоммуникации. 2000. №2. В печати.

45.Надеев А.Ф. Алгоритмы приема многоэлементных сигналов с поэлементным принятием решений на основе марково-смешанных полигауссовых вероятностных моделей// Телекоммуникации. 2000.№2. В печати.

---

Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.  
Печ. л. 2,0. Усл. печ. л. 1,86. Усл.кр.- от 1,86. Уч.- изд.л. 2,0.  
Тираж 100 экз. Заказ А32.

---

Типография Казанского государственного технического университета

420111, Казань, К.Маркса, 10.





2-00